

締固めた凝灰岩の剪断特性

鳥 山 暁 司*

Shearing Properties of Compacted Tuff Koushi TORIYAMA

Synopsis The consolidated undrained triaxial compression tests were performed with the compacted tuff used for semipermeable material of a filldam and the effects of compaction moisture content w and dry density ρ_d on shearing properties were experimented.

The following results were obtained from these test. (1) Pore pressure at failure Δu_f is decreased with increment of w and ρ_d and Δu_f comes to negative value. (2) The compressive strength and strength parameters c' and ϕ' are increased with dry density. (3) The failure criterion for noncohesive sandy soil is approximated with bi-linear envelope passed to origin.

1. ま え が き

フィルダムの半透水性ゾーンはダムサイト近傍の材料が用いられ、礫から細粒分までが含まれる。しかし、フィルダム内部の力学的安定からは比較的問題の少ない箇所にゾーニングされるため、その剪断特性はあまり検討されていない。

農林水産省中国四国農政局管内で建設中のNダムでは角礫凝灰岩を半透水性材料として、遮水ゾーンの上下流側に配置している。材料の角礫凝灰岩はダム上流の地山にあり、これを掘削して用いるが、掘削すると完全に土砂化し、礫混り砂質土の状態になる。このような材料の締固め含水比と密度を変えた場合の剪断特性は実験されていない。また、フィルダムの設計に修正震度法を用いる方向での検討もなされている。この場合にはロック材や半透水性材料の剪断強度の設計数値を今までのように $c=0$ で ϕ のみを用いる方法ではフィルダムの設計は困難になる。

そこで、細粒分を含む角礫凝灰岩よりの5mmふるい通過材料を用いて三軸圧縮試験を行い、締固め含水比と乾

燥密度の変化による剪断特性の変化を求めた。この結果、締固め密度の増加とともに c' 、 ϕ' は増加するが、細粒分の存在のため、締固め含水比が強度特性に影響し、さらに供試体を水浸すると c' のみならず ϕ' も減少する場合が多いことを示した。

2. 試料土と実験方法

実験に用いた試料土は前述のように掘削した角礫凝灰岩である。地山では固結状態にあるが、掘削後、袋詰めにして実験室に搬入されたときには砂礫状になっていた。

実験には自然含水比のまま5mmふるい通過分のみを用いた。自然含水比は14~15%程度であるため、実験に用いる含水比は自然含水比およびその乾燥側の12~13%と湿潤側の17~18%を目標とした。乾燥側は試料土を室内で徐々に乾燥後、袋に入れ、湿潤側は加水混合後、袋に入れて1週間以上置いた後、実験に用いた。試料土の物理的性質は別報¹⁾に示す。

三軸圧縮試験では締固め含水比と締固め密度の影響を求めするため、締固めは直径5cm、高さ12.5cmのモールドを用い、これに試料土を層状に入れ、この上に長さ20cm、直径4.6cmの木の棒を置き、これをランマーで突き固める方法を用いた。締固めは3層7回、4層15回、5層30回、

* 農村工学講座

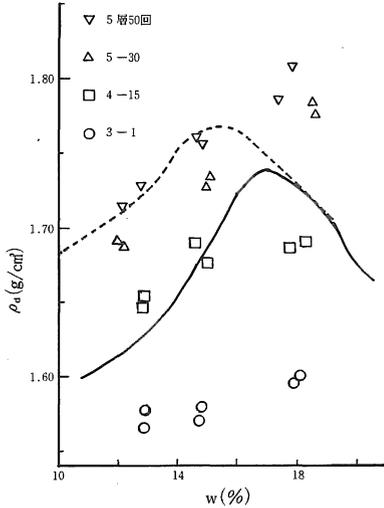


図-1：試料土の締固め曲線と供試体の含水比-乾燥密度の関係

5層50回の4種を用いた。

試料土は細粒分(74μm以下)を20%含むため、水浸によって強度特性が変わると考えられた。そこで締固めたままの非水浸状態の他に、三軸セルに供試体をセット後、5~6時間、動水勾配7~8で通水後、圧密中に背圧 $u_0 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ を加えた水浸状態での実験も行った。

三軸圧縮試験は全て圧密非排水条件とし、ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.2\%/min$ とした。有効圧密圧力 σ'_{3c} は非水浸、水浸状態とも1.0, 2.0, 3.0, 4.0 kgf/cm^2 とした。実験は締固め含水比を3種、締固めの仕事量を4種、水浸と非水浸の2条件で各4本の供試体を用いるため、合計96本の供試体を用いた。24条件での4本の供試体の平均供試体諸元を表-1に示す。また、締固め含水比 w と乾燥密度 ρ_d の関係および締固め試験での3層25回(E_c)と3層50回($2E_c$)での w と ρ_d の関係を図-1に示す。透水試験用供試体の場合と同様に最適含水比 w_{opt} の湿潤側になっても、 w の増加とともに ρ_d が大きくなっている。このため、表-1の飽和度 S_r が100%近くになっており、標準締固めと異なった締固め特性を示している。

3. 実験結果

試料土が細粒分を20%含む砂質土ではあるが、最もゆるい3層7回の締固め供試体でも乾燥密度が ρ_d が $0.90 \rho_{dmax}$ 以上あるため、全ての供試体の応力-ひずみ曲線で最大値が生じた。この破壊ひずみ ϵ_f は多くの供試体が2~3%であるが、ゆるい供試体では $\sigma'_{3c} = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、8%近くまで、また密な供試体では $\sigma'_{3c} = 1.0, 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、 ϵ_f が2%以下になった。

表-1：供試体の平均諸元

	実験前				実験後
	w %	ρ_d g/cm ³	e	S_r %	
TA1-N	14.77	1.579	0.689	57.2	15.63
TA1-A	14.73	1.571	0.697	56.3	24.17
TA2-N	14.59	1.689	0.579	67.2	16.16
TA2-A	14.99	1.676	0.592	66.7	21.59
TA3-N	14.95	1.727	0.543	73.5	16.68
TA3-A	15.04	1.734	0.538	74.6	20.17
TA4-N	14.77	1.757	0.518	76.1	16.09
TA4-A	14.58	1.761	0.514	75.6	19.30
TB1-N	17.89	1.596	0.671	71.1	18.47
TB1-A	18.06	1.600	0.667	72.2	23.73
TB2-N	18.30	1.690	0.578	84.5	18.47
TB2-A	17.79	1.686	0.581	81.6	20.64
TB3-N	18.49	1.784	0.496	99.7	17.60
TB3-A	18.61	1.777	0.501	100.5	18.41
TB4-N	17.77	1.809	0.475	99.9	17.13
TB4-A	17.32	1.786	0.493	93.9	18.39
TC1-N	12.90	1.577	0.691	49.8	13.67
TC1-A	12.70	1.566	0.703	48.2	24.40
TC2-N	12.88	1.653	0.615	55.9	13.76
TC2-A	12.83	1.646	0.621	55.2	22.49
TC3-N	12.01	1.691	0.577	54.2	13.34
TC3-A	12.21	1.687	0.580	56.1	21.04
TC4-N	12.65	1.729	0.542	62.2	14.21
TC4-A	12.10	1.715	0.555	58.2	20.25
TC5-N	12.95	1.669	0.598	57.8	14.02
TC5-A	12.83	1.677	0.590	58.0	20.86

(注) N：非水浸，A：水浸

数字 1：3層7回，2：4-15，

3：5-30，4：5-50，5：5-25

非水浸供試体では剪断中の間隙圧 Δu はほとんど生ぜず、 $w = 17\sim 18\%$ で締固め密度の高い供試体では $\Delta u_f < -0.1 \text{ kgf/cm}^2$ を生じたが、大部分の供試体では Δu_f は $-0.10\sim 0.10 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲にある。これに対して、水浸供試体では間隙圧は変化し、図2のように σ'_{3c} の増加とともに Δu_f が大きくなる。また、図3のように締固め仕事量が大きく、供試体が密になるほど Δu_f が小さくなる傾向がある。これを間隙圧係数 $A_f = \Delta u_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ でみると、非水浸供試体では全て $|A_f| \leq 0.03$ であり、水浸供試体でも締固めが3層7回の供試体の一部に $A_f = 0.1\sim 0.2$ が生じる他は $|A_f| < 0.1$ であり、間隙圧の圧縮強度への影響は小さい。圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は圧密圧力が σ'_{3c} の増加とともに大

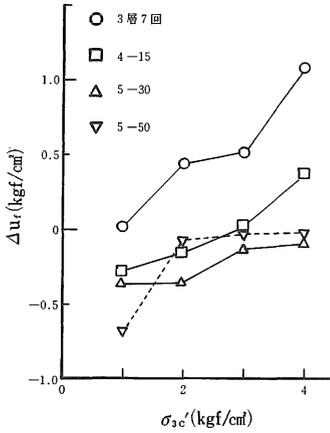


図-2：水浸供試体の圧密圧力と破壊時間隙圧の関係

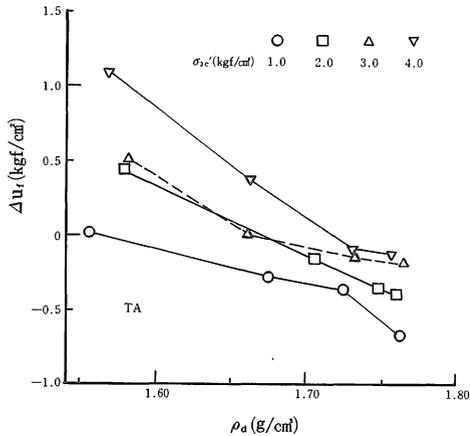
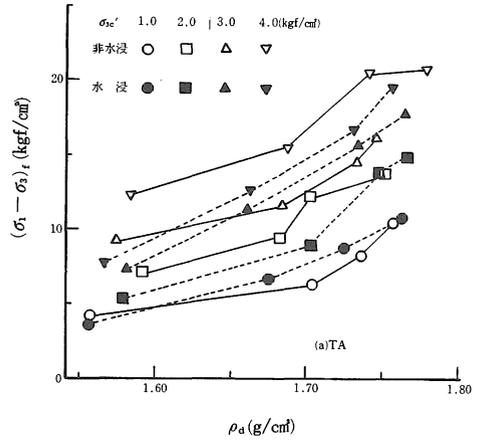


図-3：乾燥密度と破壊時間隙圧の関係

きくなる。また乾燥密度 ρ_d の増加とともに $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ は大きくなる。 ρ_d と $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ の関係を図-4に示す。この図より、TAでは ρ_d が小さい範囲では水浸により $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ はかなり減少しているが、 ρ_d の増加とともにその差は小さくなっている。これは Δu_t が ρ_d の増加とともに正から負となり、 σ'_c が大きくなることも原因の一部であろう。TBでは ρ_d が小さい範囲では非水浸の方が水浸より大きな $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ であるが、 ρ_d が大きくなると非水浸の $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ の方が水浸より小さくなる。これに対して、TCでは水浸の $(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ は非水浸より全て小さく、締固め含水比による水浸の影響が顕著である。

強度定数 c' 、 ϕ' を表-2に示す。また、乾燥密度 ρ_d と c' 、 ϕ' の関係を図-5に示す。強度定数は4本の供試体の結果により求めているため、各供試体のばらつきが c' 、 ϕ' に

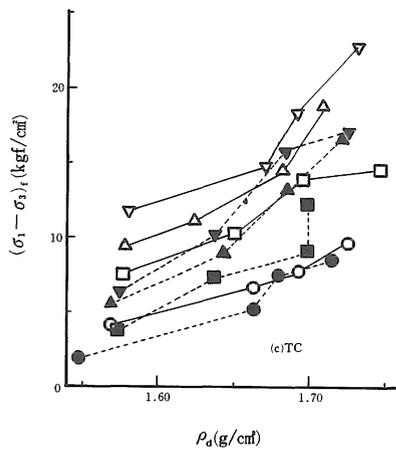
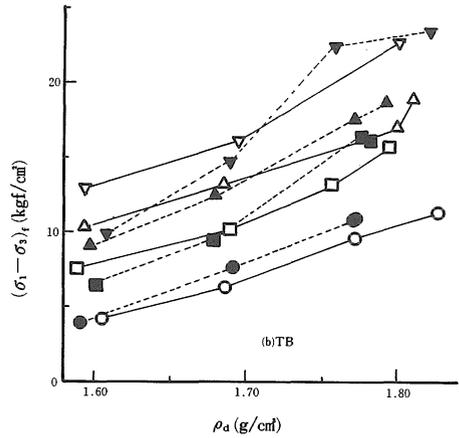


図-4：乾燥密度と圧縮強度の関係

表-2: 実験よりの強度定数

	c' kgf/cm ²	ϕ'	ϕ'_1
TA1-N	0.395	35.19	42.63
TA1-A	0.486	31.38	40.65
TA2-N	0.818	36.87	49.29
TA2-A	0.681	35.90	44.73
TA3-N	0.724	42.19	52.90
TA3-A	1.328	37.21	49.74
TA4-N	1.528	39.35	55.79
TA4-A	1.345	39.55	51.12
TB1-N	0.349	36.76	42.37
TB1-A	0.041	38.97	39.55
TB2-N	0.717	38.69	48.12
TB2-A	0.824	36.37	45.47
TB3-N	0.563	45.11	51.87
TB3-A	0.672	43.35	48.50
TB4-N	1.507	41.51	54.85
TB4-A	0.738	43.79	50.15
TC1-N	0.496	34.22	42.02
TC1-A	0.188	31.52	35.33
TC2-N	1.097	34.44	49.71
TC2-A	0.665	33.65	44.37
TC3-N	1.149	39.26	52.10
TC3-A	0.814	39.16	48.41
TC4-N	1.194	43.20	55.45
TC4-A	0.973	40.40	50.70
TC5-N	0.928	38.38	50.56
TC5-A	1.008	33.81	46.22

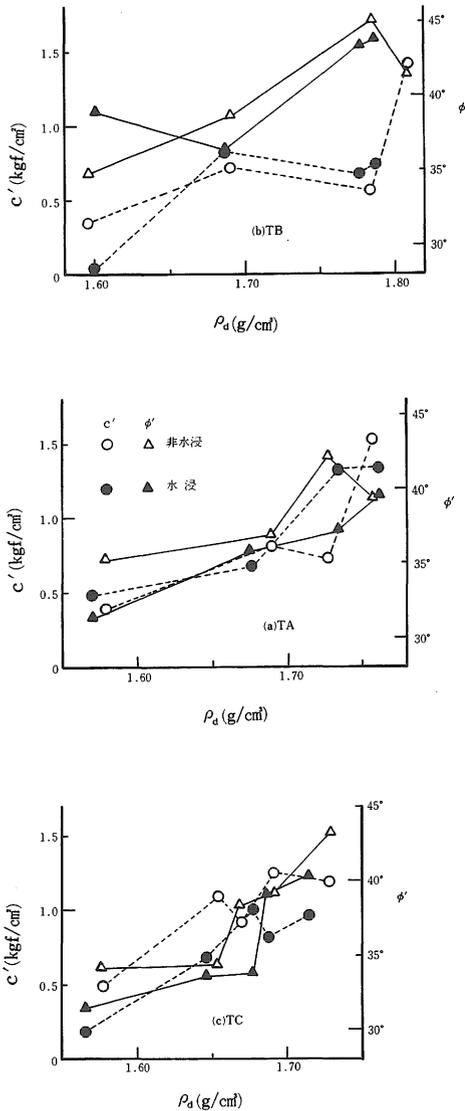


図-5: 乾燥密度と強度定数の関係

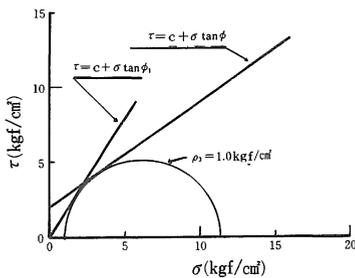
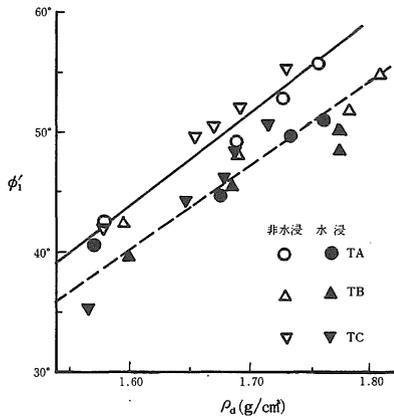


図-6: モール・クーロン式の修正方法

大きく影響する。このため、 c' 、 ϕ' と ρ_d の関係もばらつきが大きいが、 ρ_d の増加とともに強度定数は増加している。実験に用いた凝灰岩は細粒分を20%含むが、この供試体を水中に置くと、吸水して崩壊してしまい、実際には粘着力は存在しない。したがって、ここでの粘着力 c' は $\sigma'_{3c} = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ の破壊包絡線を直線とした場合に求まるみかけの粘着力である。そこで、モール・クーロンの破壊包絡線を図-6に示すように原点をとおり、 $\sigma'_{3c} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ のモールの応力円に接する直線と c' 、 ϕ' を有する2本の直線で近似すれば、みかけの粘着力 c' は σ' が小さい応力では存在しないこととなり、実際とよく対応する。また砂や礫での三軸試験で σ'_{3c} が小さいほど、 ϕ' が大きいう結果ともよく対応する。

原点をとおりモールの応力円への接線からの内部摩擦角を ϕ'_1 とすると

図-7：乾燥密度と内部摩擦角 ϕ'_1 の関係

$$\phi'_1 = \sin^{-1} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma'_1 + \sigma'_3)_f} \quad (1)$$

である。 $\sigma'_{3c} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ での ϕ'_1 を表-2に示す。また乾燥密度 ρ_d と ϕ'_1 の関係を図-7に示す。締固め含水比の高いTBの ϕ'_1 が他に比べてやや小さいが、非水浸、水浸の ϕ'_1 と ρ_d の関係を直線で近似すると

$$\text{非水浸 } \phi'_1 = -80.0 + 77.4 \rho_d \quad (r = 0.958)$$

$$\text{水浸 } \phi'_1 = -78.3 + 74.1 \rho_d \quad (r = 0.951)$$

となる。

砂質土の剪断強度式を図-6に示すように近似する。

$$\tau = \sigma' \tan \phi'_1 \quad \sigma \leq \sigma'_0 \quad (2)$$

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad \sigma \geq \sigma'_0 \quad (3)$$

ここに

$$\sigma'_0 = \frac{c'}{\tan \phi'_1 - \tan \phi'} \quad (4)$$

この式の適用性については σ'_3 が 1.0 kgf/cm^2 以下の場合についての実験を行い、さらに非線形の剪断強度式との比較も必要であり、これは別途、検討する⁽²⁾。

4. 考 察

供試体の平均含水比と平均乾燥密度の関係を図-2に示した。3層7回の供試体の締固めエネルギーは 6.42 kgf-cm/cm^2 で、標準締固め仕事量に等しいが、ランマーと土の間に木の棒があるため、ここでのエネルギーロスが生じること、モールド径が小さいため、土と壁面の摩擦抵抗が大きくなる。このため、標準締固めに比べて ρ_d が小さく、 $0.90\rho_{d\max} \sim 0.92\rho_{d\max}$ となった。約3倍の締固め仕事量の4層15回がほぼ標準締固めでの $w \sim \rho_d$ となっている。

5層30回と5層50回ではさらに密度が増加しており、特に w_{opt} の湿潤側でも ρ_d は増加し、標準モールドでの3層50回の締固めの $\rho_{d\max}$ より大きな ρ_d となっている。 $w = 17 \sim 18\%$ の5層50回締固めでは、モールド底面から水がにじみ出ており、砂質土のため締固め中に排水が生じたことも ρ_d 増加の一因と考えられる。これらの供試体では計算上の初期飽和度は100%に近いが、非排水状態での間隙圧増加量は小さく、粘性土の S_r が100%近くになると大きな間隙圧が生じることと比較すると、特異な傾向である。これは非水浸供試体の剪断中の間隙圧の変化が非常に小さいことにも現われている。

水浸供試体では剪断中に大きな間隙圧変化が生じるが、圧縮強度の生じる点では間隙圧は変化の途中であるために Δu_f は小さい。大部分の供試体では破壊ひずみ e_f より大きなひずみで間隙圧の変化量 $|\Delta u|$ は最大値となり、3層7回のゆるい供試体では、 $\sigma'_{3c} = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ では $\Delta u > 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ が生じる場合があり、5層50回の密な供試体では $\Delta u < -1.0 \text{ kgf/cm}^2$ となる供試体もある。締固め含水比の増加とともに ρ_d が増加するため、 w の増加とともに正の間隙圧は小さく、負の間隙圧となっている。

圧縮強度は乾燥密度の増加とともに大きくなる。締固め含水比によって ρ_d が異なるが、非水浸状態では、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ はほぼ同じ大きさとなっている。これは締固め含水比が自然含水比を中心に5~6%の範囲にあり、かつ Δu_f が0に近いことによる。これに対して水浸供試体では、締固め含水比 w が大きくなるほど $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ も大きくなる傾向にある。これは w の大きい供試体ほど Δu_f が小さくなるため、 σ' が大きくなり、強度が大きくなるが、表-1の実験後の含水比例 w' を見ると w の大きいTBの w' が最も小さく、 w の小さなTCの w' が最大となっており、細粒分を含む締固め土では締固め含水比が土の構造に影響していることが推定される。

5. 結 論

締固めた凝灰岩の剪断特性への締固め含水比 w と乾燥密度 ρ_d の影響を三軸圧縮試験より求め、さらにモール・クーロン式について検討した。これより

- (1) 水浸供試体では ρ_d は w の増加とともに破壊時の間隙圧 Δu_f は小さくなり、負の間隙圧が生じる。
- (2) 圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は ρ_d の増加とともに大きくなる。非水浸と水浸供試体の強度の差は w の増加とともに大きくなる。
- (3) モール・クーロン式の c' 、 ϕ' は ρ_d の増加とともに大きくなる。
- (4) 剪断強度式として(2)、(3)式の修正モール・クーロン

式を用いると低い垂直応力まで、砂質土の剪断強度を合理的に表示できると考えられる。

砂質土の剪断強度式として(2)、(3)式の修正モール・クーロン式を用いる方法については、三軸圧縮試験において拘束圧 σ_3 が 1.0 kgf/cm^2 以下での実験を行い、低圧から σ_3 が $4 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲の破壊包絡線の形状を求める必要がある。さらに設計上、安全側の数値となると同時に設計計算においても容易に利用できる剪断強度式であることが望ましい。これらについては今後、実験を行い、

検討する予定である。

なお、本実験を行うには平成2年度、島根大学農学部農業施設工学研究室専攻生の土居 修君、森尾昭彦君、山田吉輝君に多大のご協力を賜りました。記して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 鳥山昶司：島根大学農研報，25：投稿中，1991.
- (2) 鳥山昶司：農土誌，投稿中，1991.